

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE EM CENTROS URBANOS

Elielza Moura de Souza Barbosa, Ana Lucia Candeias, Chigueru Tiba e Olga Castro Vilela.

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear.

Grupo de Fontes Alternativas de Energia

Av Prof. Luiz Freire, 1000- CDU Recife PE Brasil CEP 50.740.540

elimsb@hotmail.com.br

RESUMEN: El establecimiento de la política que puede fomentar el desarrollo de la generación eléctrica descentralizada en áreas urbanas, más específicamente, por medio de la tecnología de los Sistemas de Fotovoltaicos Conectado a Red (SFCR), depende fuertemente de la evaluación de su efectivo potencial y de sus límites económicos factibles. Sin embargo el conocimiento del potencial del recurso solar es determinante, la evaluación debe ser acompañada por las estimaciones de la disponibilidad de la superficie para las instalaciones, información técnica relativa al funcionamiento del sistema y a los incubencias y a las partes implicados en función de la reducción en la consumición de la energía de la red convencional. Dentro de este contexto, el desarrollo de una metodología de la evaluación del potencial de la generación eléctrica para SFCR en los tejados de espacios urbanos se presenta. La metodología basa en referir evaluaciones los tres potenciales: el potencial físico representado por la cantidad total de energía cogió para el área resuelta en el comentario; el potencial geográfico traducido en el apresto del área del captation de la energía del incidente y del técnico potencial se relacionó con la tecnología de la generación de la energía del fotovoltaica, del funcionamiento y de las técnicas de las características del equipo. Los procedimientos y los metodológicos usados que las herramientas habían sido agrupadas en cinco ambientes (físico, geográfico, técnico, económico y analítico) en función de los productos resultantes de que ellas pueden ser generados.

PALABRAS CLAVE: Sistemas Fotovoltaicos, Generación eléctrica descentralizada, Evaluación del potencial de tejados solares

INTRODUÇÃO

O estabelecimento de políticas que possam fomentar o desenvolvimento da geração elétrica não centralizada em meios urbanos, mediante sistemas fotovoltaicos depende fortemente da avaliação do seu potencial efetivo e de seus factíveis limites econômicos. A avaliação não deve se limitar ao conhecimento do recurso solar, muito embora, esse seja determinante. Necessita também de estimativas da disponibilidade de superfície para as instalações, de informações técnicas relativas ao desempenho dos equipamentos, dos custos envolvidos e de possíveis receitas em função da redução no consumo da energia da rede convencional, por exemplo, créditos de Carbono (CO₂ evitado) pela utilização da energia limpa gerada. O presente trabalho aborda o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação do potencial de geração elétrica por Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR). Fundamenta-se em avaliações referentes a três potenciais: o Potencial Físico, representado pela quantidade total de energia captada por determinada área em observação; o Potencial Geográfico, traduzido no dimensionamento da área de captação da energia incidente e o Potencial Técnico, relacionado à tecnologia de geração de energia fotovoltaica, desempenho e características técnicas dos equipamentos. Em função dos produtos e resultados gerados, os procedimentos e ferramentas metodológicos utilizados são agrupados em cinco ambientes: *Físico, Técnico, Geográfico, Econômico e Analítico*. Os resultados associados resultam em estimativas da potencialidade de SFCR em centros urbanos, especificamente quando os sistemas são localizados em coberturas de edificações, situação no qual são denominados de Telhados Solares ou Telhados Fotovoltaicos.

AVALIAÇÕES DE POTENCIAIS DE SFCR-DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Alguns estudos abordam avaliações do potencial solar para geração de energia elétrica estimando a área das superfícies disponíveis para a instalação de sistemas FV em telhados, como em Steemers, (2001) e Izquierdo et al.,(2008). No entanto, no Brasil, os estudos vêm sendo realizados tendo como princípios a existência do recurso solar em contrapartida ao suprimento e/ou a redução de determinada demanda elétrica e o desenvolvimento de ferramentas direcionadas à área de legislação para o setor elétrico. Rütther et al., (2008; 2008).

De forma praticamente obrigatória, metodologias de avaliação de potencial de energias renováveis (RE) consideram três níveis hierárquicos de avaliações: a existência da fonte do recurso energético, a disponibilidade e possibilidade de sua captação e os meios técnicos existentes para transformar o recurso em energia útil. A metodologia desenvolvida segue essa hierarquia avaliando três potenciais: o Potencial Físico, representado pela quantidade total de energia captada pela

área em observação; o Potencial Geográfico, traduzido no dimensionamento da área de captação da energia incidente e o Potencial técnico relacionado à tecnologia de geração fotovoltaica, desempenho e características técnicas dos equipamentos. Os procedimentos e ferramentas metodológicos utilizados nas avaliações desses potenciais e na obtenção de informações econômico-financeiras são agrupados em ambientes interativos (físico, técnico, geográfico, econômico) em função dos produtos/resultados que podem ser gerados. O conjunto de produtos resultante é analisado como suporte de decisões (ambiente analítico). O desenvolvimento da metodologia proposta segue uma rotina de etapas como mostra o diagrama de blocos da Figura 1, Para cada um dos ambientes se tem: Dados de entrada: informações que alimentam o processo no ambiente; Ferramentas ou procedimentos: mecanismos utilizados para processar as informações gerando os resultados e Dados de saída: resultados gerados dentro do ambiente e que podem ser produtos finais e/ou dados de entrada para outro ambiente.

O **Ambiente Físico** envolve informações: da localização do espaço em estudo (coordenadas geográficas; latitude e longitude), parâmetros característicos provenientes das relações geométricas do sistema Sol-Terra (ângulos: horário, azimutal, declinação solar, cumprimento dos dias...); climatológicas e meteorológicas (nível de irradiação e temperatura ambiente) que podem ser provenientes de várias fontes como: Atlas, mapas, bases de dados de séries históricas ou de medições locais. Na ausência de dados da radiação incidente no local, estimativas da radiação solar no plano horizontal até a energia incidente no local podem ser realizadas via procedimentos clássicos, “modelo de Duffie e Beckman” e correlações, “correlações de Liu e Jordam”, por exemplo, (Kreith et al., 1978; Lorenzo, 1994; Tiba et al., 2000).

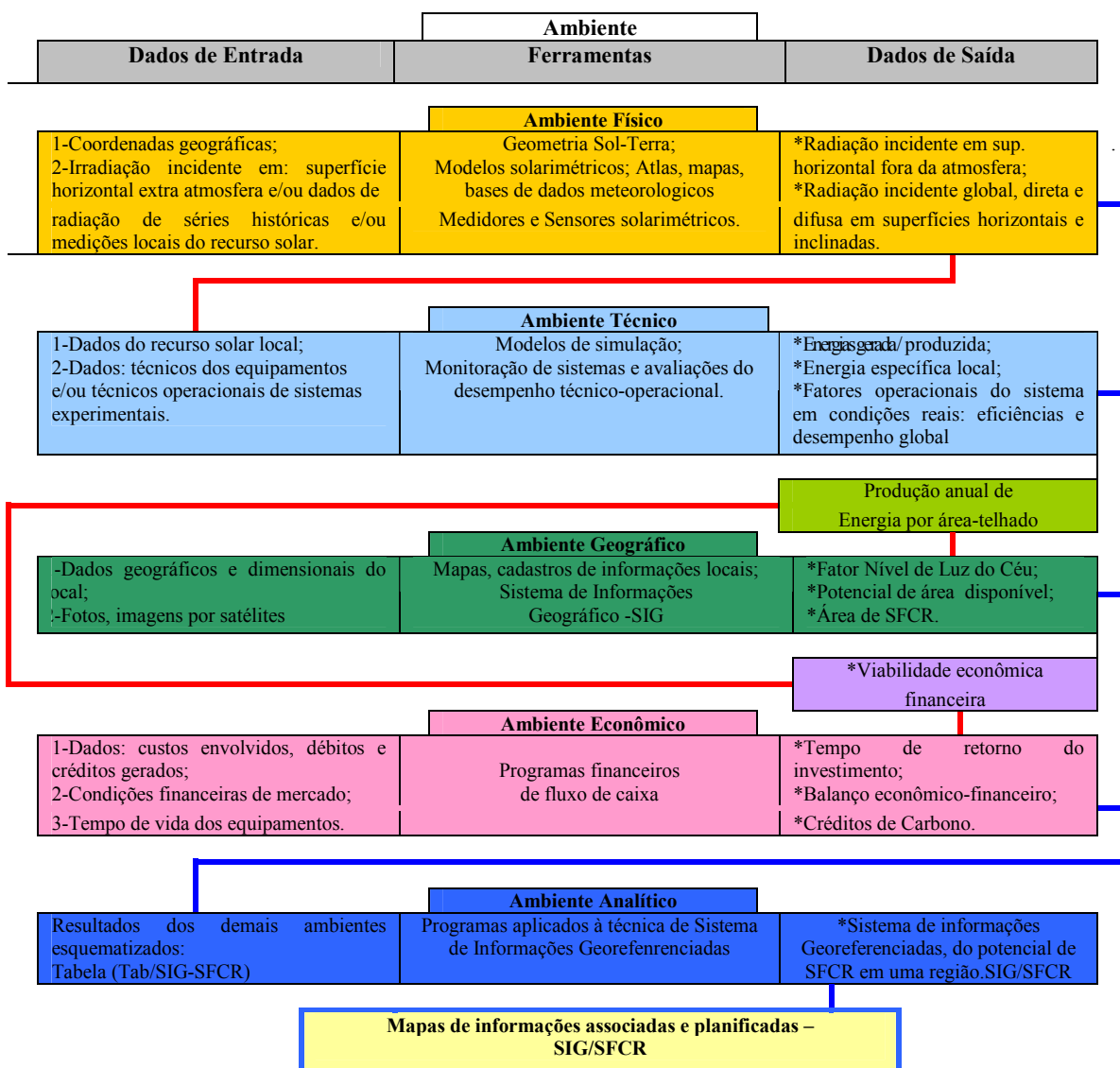


Figura 1: Diagrama de bloco: Metodologia de avaliação do potencial de telhados solares.

O **Ambiente Técnico** tem como base fundamental informações técnicas do sistema e de seus componentes provenientes de fabricantes e/ou de avaliações técnicas de sistemas operativos. No primeiro caso, as informações técnicas de catálogos e dados do recurso solar são utilizadas em modelos de simulação para a determinação da energia útil produzida. No segundo caso, a análise técnica baseada em dados experimentais permite que os parâmetros de desempenho do sistema sejam determinados em reais condições de operação. Como produto final, apresenta a produção total de energia, o coeficiente global de desempenho (PR) do sistema. Com esses valores a densidade de potência específica para a região

em estudo é determinada. Por exemplo, Barbosa, (2009) utilizando dados experimentais de um ano de operação de um sistema protótipo determinou a densidade de potencia específica para a região urbana da Cidade do Recife. Os resultados obtidos acusam valores, médio anual, de 0,7 para o PR e 156 kW/m² como energia específica. Evidentemente esse valor é atingido quando o gerador fotovoltaico encontra-se corretamente posicionado e livre de sombras. Baseado nesses resultados SCFR podem ser projetados partindo-se da demanda a ser suprida e/ou da área disponível. Por exemplo, uma área de fotovoltaicos de 100m² poderá produzir cerca de 15,6 MWh/ano.

O **Ambiente Geográfico** utiliza ferramentas e dados relativos ao espaço geográfico para estimar a disponibilidade de área útil. Mapas e fotografias aéreas georreferenciados, imagens de satélites, bases de dados demográficos, sociais e urbanistas são utilizados. A utilização de mapas georreferenciados permite a determinação das dimensões e dos posicionamentos dos telhados das edificações existentes no espaço em observação. Fotografias das edificações fornecem maiores detalhes que auxiliam a determinação das configurações e tipos de telhados. Apresenta como produto: o fator Nível de Luz do Céu (NLC), indicativo da quantidade e qualidade de visão de céu da localidade foco e estimativas das áreas de telhados úteis e disponíveis a instalação de SFCR. O conhecimento da área disponível para a instalação de sistemas FV é um dado de entrada primordial para avaliações do potencial de SFCR em centros urbanos. Normalmente, esse tipo de informação não existe ou não se encontra disponibilizado, sendo necessário o desenvolvimento de métodos/procedimentos para sua estimativa. De modo geral, métodos para estimativas de áreas disponíveis para instalações de sistemas solares devem apresentar certas características como: possibilidades de realização computacional com baixo custo e erro e considerar diversos fatores intrínsecos e adicionais à sua extensão: posicionamento (localização, orientação e inclinação), ocupação para outras finalidades, possibilidades de sombras e impedimentos não-físicos, por exemplo, valores históricos, religiosos ou ambientais. Técnicas e procedimentos aplicados para um determinado local, nem sempre são válidos para outros universos. Como comentado por Izquierdo et al., (2008), critérios adotados para uma pequena localidade, por exemplo, um pequeno centro urbano, poderão não ser viáveis em espaços de maiores escalas como grandes centros urbanos, estados, países e continentes.

Uma maneira analítica de descrever as características da massa urbana (área por densidade de edificações) e o espaçamento entre as edificações é pelo Fator de Visão do Céu (SVF), um parâmetro adimensional também conhecido como fator de configuração ou fator angular. Definido como a quantidade de céu visível de um determinado ponto. O SVF varia de 0 a 1 e indica, em termos gerais, o nível de obstrução para a luz, ou seja, a oclusividade do local. Quando igual a 1 (um) indica uma situação totalmente não obstruída. O Fator Visão de Céu, nas áreas da arquitetura e climatologia urbana, representa um parâmetro geométrico urbano diretamente relacionado às condições térmicas de um local, podendo ser avaliado por vários métodos: modelos matemáticos, análises fotográficas, processamento de imagens, diagramas gráficos ou via mapas da trajetória do Sol. Normalmente, esses métodos demandam muito tempo com um grande trabalho manual e/ou equipamentos fotográficos de alto custo. Em avaliações do potencial solar para geração de energia elétrica, análises das áreas disponíveis em centros urbanos têm sido estimadas utilizando-se fatores indicativos do (SVF). Por exemplo, Steemers, (2001), determina o fator área/volume para várias localidades da Europa, relacionando os resultados obtidos a índices de potencialidades de instalação de SFCR. Como conclusão mostra que as localidades com grande densidade de edificações e, portanto, com ruas mais oclusivas, são menos favoráveis a SFCR instalados em fachadas. Sítios mais dispersos favorecem SFCR instalados em fachadas e em telhados. Já Izquierdo et al., (2008) avalia o potencial para SFCR para a Espanha utilizando banco de dados de unidades administrativas que compõem o país, das superfícies ocupadas pelas edificações e pela densidade habitacional de cada unidade administrativa espanhola. A área disponível à instalação de SFCR é estimada considerando diferentes composições entre os fatores densidade demográfica e densidade de edificações, ponderados por critérios restritivos vinculados à não ocupação, à probabilidade de sombras e à utilização da área para outras finalidades. Na presente proposta, o processamento das informações relativas à área disponível, mediante determinadas condições, gera um índice, o qual foi denominado **Nível Luz do Céu (NLC)**, indicativo da quantidade e qualidade da iluminação na localidade foco, portanto, também um fator indicativo do (SVF). Em seguida, esse índice é utilizado para estimar e classificar as áreas úteis de coberturas disponíveis a SFCR.

Procedimento proposto para estimativa do Nível Luz do Céu e área útil de cobertura

Para a estimativa da área útil coletora da radiação incidente, ou seja, à área do gerador/arranjo FV, podem ser utilizados como ferramentas principais: Mapas da região digitalizados e georreferenciados (GIS)², fotografias das edificações como ferramenta auxiliar, bases de dados de informações demográficas e/ou de registro de bens imóveis. E, definidos como: Área Total de cobertura da edificação (A_t) - área geométrica, estimada diretamente do sistema GIS/mapas georreferenciados; Área Disponível (A_d) - área disponível para a instalação do sistema; Área do Arranjo FV (A_a) - área útil, a área do gerador FV; Fator de Disponibilidade (F_d) - necessidade de espaço físico para a estrutura de sustentação e instalação dos módulos FV. Envolve também o distanciamento entre módulos necessário ao não-sombreamento entre os mesmos; Fator de Ocupação (F_o) - resultante da redução pela ocupação da área para outras atividades; Fator de Posição (F_p) - não desvio de posicionamento em relação ao Norte Geográfico; Fator de Sombra (F_s) - parcela da área total livre de possível sombreamento por outras edificações e objetos permanentes na vizinhança da área foco; Fator Nível de Luz do Céu (NLC) - relação entre a área útil e a área disponível da cobertura da edificação. Gerado como produto da metodologia proposta.

1-Fator de Disponibilidade (F_d) -O espaçamento (d) entre os módulos ou fileira de módulos FV, necessário para o não sombreamento entre os mesmos, depende, além das dimensões dos próprios, da latitude do local e do ângulo (β) de

¹ (Sky View Factor – SVF)

² SIG-Sistema de Informações Geográficas (Geographical Information System-GIS)

inclinação do plano do arranjo FV Deve ser calculado para a situação correspondente à sombra máxima que ocorre no solstício de inverno, (21 de junho) para localidades no Hemisfério Sul. Pode ser calculado, utilizando-se o Fator K como indicado na Figura 2a. O Fator K é um coeficiente adimensional que envolve variáveis de posicionamento do plano do módulo em relação ao “movimento do Sol” (movimentos de rotação e translação da Terra). A Figura 2b mostra graficamente a variação do fator K em função da latitude do local. O espaçamento, $d = K.L.\text{sen}(\beta)$, implica em um acréscimo da área necessária para a instalação dos módulos. Portanto, a área da superfície, incluindo as áreas relativas aos próprios módulos e aos espaçamentos entre eles, pode ser obtida como o produto da área do arranjo pelo valor $(K \text{ sen } \beta + \cos \beta)$. Na prática, esse espaço é suficiente para a montagem, instalação e fixação da estrutura de suporte.

2-Fator de Ocupação (F_o) -_Fotografias aéreas e de satélites são bastante úteis na visualização da existência de alguma ocupação na área em observação. Possibilitam extrair grande variedade de informações dependendo da qualidade da imagem. O fator (F_o) varia no intervalo de zero, totalmente ocupado, a um, totalmente livre. Quando o universo de estudo é acessível e contém poucas edificações pode ser medido ou calculado, dependendo da qualidade das informações disponíveis. Assume o valor de 1 (um) quando desconhecido ou na impossibilidade de sua determinação, acarretando uma maior imprecisão na estimativa da área útil (A_u).Três valores para o Fator de Ocupação foram atribuídos para as várias possibilidades de ocupação da área em observação como explicito na Tabela 1. O conhecimento prévio da finalidade de uso da edificação e/ou de sua cobertura pode, a princípio, definir o Fator de Ocupação (F_o). Como por exemplo, proibição de utilização da área por motivos de segurança ou de patrimônio histórico, o planejamento da utilização da área para terraços ou para sistemas de ventilação, casos em que o Fator de Ocupação é nulo.

3-Fator de Posição (F_p) -_Para maior captação anual da irradiação, o plano do arranjo deve ser situado faceando o Norte, (locais no Hemisfério Sul) A ocorrência de edificações cujas coberturas não permitem alinhar o plano do arranjo à linha Norte-Sul (N-S) reduz a quantidade anual da energia coletada e, conseqüentemente, da energia produzida pelo sistema. O não alinhamento (desvio) pode ser calculado com as informações das coordenadas geográficas do local provenientes de fotografias e/ou mapas georreferenciados. A Figura 2b mostra a variação percentual no valor anual da irradiação incidente em uma superfície horizontal em função do ângulo de não-alinhamento N-S. Um desvio de 15° acarreta uma redução na energia coletada da ordem de 3,5%, admitido como limite prático para instalações de sistemas solares planos fixos, (TIBA et al., 1999). Nessa situação, o $F_p = 0,965$.

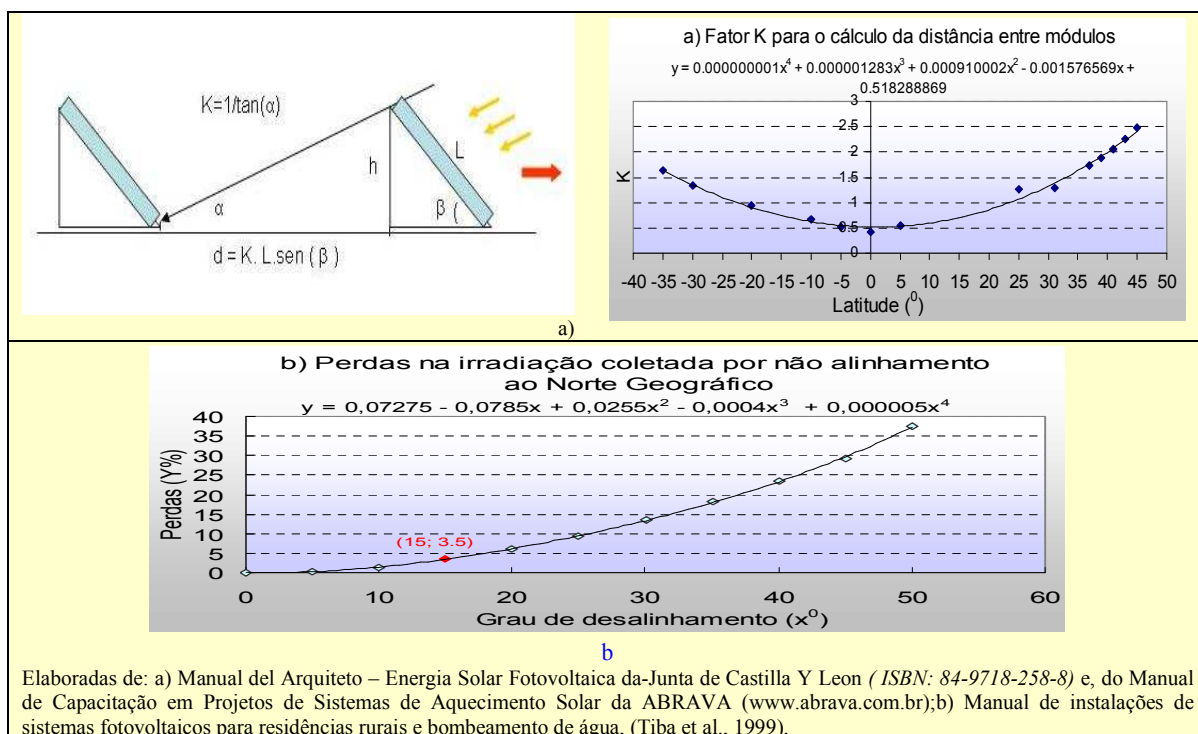


Figura 2: a) Valor do Fator K para o cálculo da distância (d) necessária à situação de não-sombras entre fileiras de módulos FV; b)Perda na radiação coletada por não alinhamento ao Norte Geográfico.

4- Fator de Sombra, (F_s) -_A estimativa do fator F_s apresenta uma dificuldade maior que os demais fatores. Depende muito do crescimento urbano. Um obstáculo de altura (Y), na Cidade do Recife, posicionado faceando o Leste, pode projetar um sombreamento de três vezes sua altura no solstício de inverno. Os métodos clássicos por traçado de diagramas de sombras são bastante trabalhosos. Como uma regra prática em instalações individualizadas, o plano do gerador deverá ser posicionado livre de obstáculos a 60° a Leste e a Oeste em relação à Linha N-S e a uma altura solar de 15° , (TIBA et al., 1999), situação bastante rara em centros urbanos. Para análises em grandes universos, (cidade, países, continentes) estimativas da probabilidade de sombras podem ser realizadas pela relação entre a área e o volume das edificações e as alturas das mesmas. Edificações de alturas semelhantes apresentam menor probabilidade de ocorrência de sombras. Alta densidade de edificações de diferentes alturas implica uma alta probabilidade de sombreamento.A metodologia apresentada estima o fator (F_s) utilizando informações provenientes dos mapas georreferenciados e de

fotografias dos telhados (coordenadas de posição, e distancia entre as edificações) e de cadastros de edificações (alturas das edificações). Os valores máximo e mínimo de ($F_s=1$; $F_s=0$) ocorrem para uma área totalmente livre de sombras ou sombreada durante a maior parte do dia. O F_s assume o valor de 0,5 para as situações intermediárias, onde há sombreamento em um dos períodos do dia (manhã ou tarde) durante o ano, conforme consta na Tabela 1.

5-Fator Nível de Luz do Céu (NLC) - O fator (NLC) sintetiza os fatores mencionados, resultando em um indicativo da quantidade e qualidade de visão de céu da localidade foco. Conhecido o valor da área total do telhado (A_t) e suas coordenadas de posição e a inclinação (β) desejada para o arranjo FV, o fator Nível de Luz do Céu (NLC), a área disponível (A_d) e a área do arranjo FV (A_a) podem ser expressas como:

$$NLC = A_d / A_t \quad (1)$$

$$A_d = A_t \cdot F_d \quad (2)$$

$$A_a = A_d \cdot F_o \cdot F_p \cdot F_s \quad (3)$$

$$NLC = F_o \cdot F_p \cdot F_s \quad (4)$$

Em função dos fatores (F_o , F_p e F_s), foi elaborada uma classificação para o fator (NLC) como indicativo da potencialidade de instalação de SFCR em telhados como consta na Tabela 1.

Tabela 1: Valores para o Fator de Ocupação (F_o), Fator de Sombras no Hemisfério Sul ($\lambda \leq 10^\circ$) (F_s) e Fator Nível de Luz do Céu (NLC)

Valor de F_o	Condição da área	Valor de F_s	Verão		Inverno	
			manhã	tarde	manhã	tarde
1	Totalmente livre, sem nenhuma ocupação	1	não	não	não	não
0,5	Parcialmente ocupadas até o máximo de 50%	0,5	não	sim	não	sim
0	Totalmente livres, sem nenhuma ocupação.	0	sim	sim	sim	sim
Classificação		Muito bom	Bom	Médio	Baixo	
Valor NLC		$0,8 \leq (NLC) \leq 1,0$	$0,7 \leq (NLC) < 0,8$	$0,6 \leq (NLC) < 0,7$	$0 < (NLC) < 0,6$	

É evidente que o valor mínimo do Fator Nível de Luz do Céu ($NLC=0$) é alcançado em qualquer situação em que um dos demais fatores envolvidos seja nulo. Por exemplo, uma excelente área de cobertura, totalmente desocupada ($F_o=1$), plana ou pouco inclinada faceando o Norte ($F_p=1$), mas com alta probabilidade de sombras durante todo o dia proveniente de edificações mais altas e vizinhas ao leste e ao oeste ($F_s=0$), resulta em um valor nulo para o Fator (NLC). Nessas situações, o espaço não é viável para a instalação de sistemas solares. Quando o (NLC) alcança o valor máximo de 1 (um) significa que a cobertura encontra-se situada livre de sombras e posicionada em termos da máxima coleção de energia anual e que a totalidade da área existente encontra-se disponível para ser ocupada totalmente pelo sistema fotovoltaico e sua estrutura. Adicionalmente, se ($F_d=1$) a área de cobertura do telhado pode ser totalmente convertida em área do arranjo FV. Esta situação particular apresenta-se quando os módulos substituem os elementos construtivos da cobertura (por exemplo, as telhas) nas chamadas Edificações Fotovoltaicas Conectadas à Rede (EFCR), considerada como tecnologia com nível zero de ocupação de área.

Ainda em relação às dimensões da área útil, dois comentários merecem atenção: nos países onde já existe uma legislação ou regulamentação para a aplicação de SFRC em edificações, como particularmente na Espanha, existe um tamanho mínimo de sistema, portanto de área útil, para que o mesmo possa ser instalado. O SFRC deve obrigatoriamente, em horas de funcionamento no ano, ser capaz de fornecer, no mínimo, 1.000 KWh de eletricidade para cada kWp instalado, (DIFUSIÓN IDAE, 2002). Um segundo ponto, muito importante, é que ainda não há uma padronização entre a dimensão física de um módulo fotovoltaico e sua capacidade nominal. Fato que dificulta o trabalho do projetista principalmente em SFRC integrados à edificação já que, normalmente, os elementos da construção civil (telhas, janelas) têm dimensões padronizadas. No entanto, há uma faixa de correspondência entre a capacidade e a dimensões de um módulo FV. Para efeitos práticos adotou-se o valor de $130Wp/m^2$

Como exemplo prático os procedimentos descritos são aplicados às edificações mostradas na Figura 3. Esse conjunto de edificações encontra-se localizados no Bairro da Várzea na Cidade do Recife-Brasil com $8,03^\circ$ de Latitude Sul e $34,5^\circ$ de Longitude Oeste. Considerando-se como critério a máxima coleção anual de energia e níveis de radiação mais homogêneos ao longo do ano, o arranjo fotovoltaico deve ser posicionado faceando o Norte Verdadeiro com ângulo de inclinação (β) de 23° . Nessas condições, o nível de radiação incidente situa-se entre 5,3 a 5,8 kWh/m².d (valor médio diário mensal), com 156 kWh/m² como densidade de energia específica, Barbosa, (2009). Na situação mais conservativa, referente a possibilidades de sombras (solstício de inverno), a distancia de espaçamento (d) necessária para não-sombreamento resulta em cerca de 20% do valor do comprimento (L) do módulo ou fileiras de módulos, de acordo com o exposto. Ou seja, cada edificação, no máximo, pode apresentar uma disponibilidade de 80% da área de sua cobertura, o que resulta em um Fator de Disponibilidade, igual para todas as áreas de telhados, de $F_d=0,8$. Na Figura 3, constam os valores para o Fator de Ocupação (F_o) estimados diretamente das imagens disponíveis. As edificações (E-1, E-2 e E-3) apresentam coberturas totalmente livres, resultando em valores de ($F_o=1$). As coberturas das edificações (E-4) encontram-se totalmente utilizada para outras finalidades, portanto, $F_o=0$. O grau de não-alinhamento, em relação à linha Norte-Sul, de cada área-telhado foi determinado diretamente via as coordenadas de posicionamento (direção e sentido) das imagens georreferenciadas. Todas as áreas de coberturas, com exceção da edificação (E-3), se apresentam alinhadas em relação ao Norte Geográfico dentro do limite estabelecido de no máximo 15° (quinze graus) de desalinhamento, ou seja, redução na radiação incidente máxima de 3,5%. Portanto, para essas edificações, o Fator de Posição resulta no valor

unitário, ($F_p=1$). A edificação (E-3) encontra-se desalinhada em cerca de 45° em relação ao Norte Verdadeiro, implicando uma perda na energia incidente de cerca de 30%, ou seja, $F_p=0,7$. Observa-se que com exceção da edificação (E-2), não há possibilidades de sombras nas coberturas das demais edificações exemplos, portanto, para essas $F_s=1$. A edificação (E-2), com cerca de 7 metros de altura, situa-se muito próxima e a oeste da edificação (E-1) com altura de 13m, possibilitando a ocorrência de sombreamento no período da manhã, ($F_s=0,5$).

Na Tabela 2 constam dados sobre essas áreas de coberturas e a classificação segundo o Fator NLC. Os resultados acusam: Muito Bom para (E-1), Bom para (E-3), Baixo para (E-2) e não viável para (E-4). A área de cobertura da edificação (E-1) apresenta a melhor condição para instalação de SFCR entre os exemplos citados. À área útil, correspondente à área do arranjo fotovoltaico e apresenta uma energia específica de 156 kWh/m^2 , para módulos de (p-Si). Observa-se a desvantagem da área (E-2). Um sistema FV com essa dimensão, 991 m^2 produziria apenas 62 kWh/ano . Produção semelhante a de um sistema FV de 397 m^2 com energia específica de 156 kWh/m^2 , ou seja com $NLC=1$.

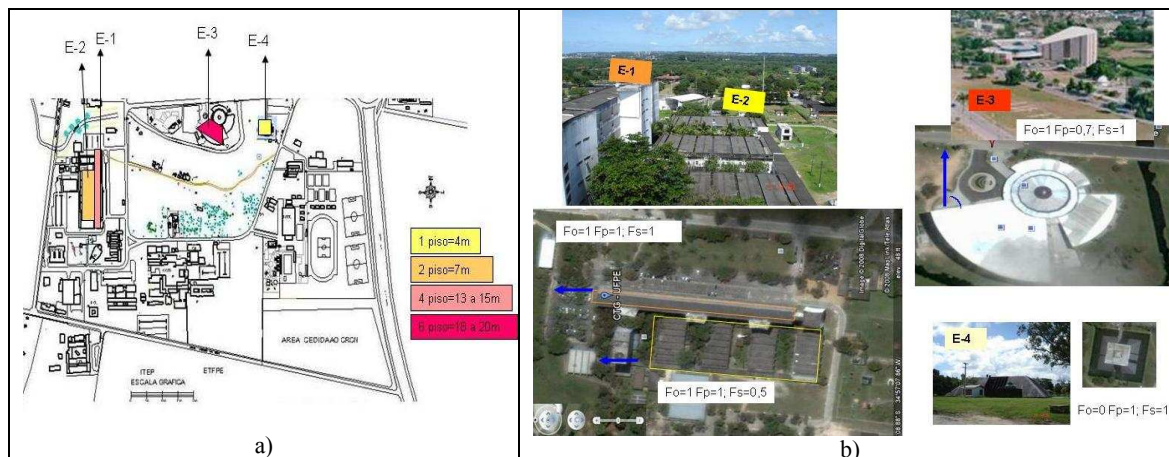


Figura 3: Conjunto de edificações-exemplos -Bairro da Várzea na Cidade do Recife-Brasil ($8,03^\circ$ de Latitude Sul e $34,5^\circ$ de Longitude Oeste):a) Planta de localização b) Imagens e fotos das edificações.

Tabela 2-. Fator Nível de Luz do Céu para edificações-exemplos

Edificação	E-1	E-2	E-3	E-4
Área total (m^2)	2.877	991	4.942	700
Fo; Fp; Fs	1; 1; 1	1; 1; 0,5	1; 0,7; 1,0	0; 1; 1
NLC	1,0	0,5	0,7	1
Classificação	Muito bom	Baixo	Bom	Não viável
Área útil (m^2)	2.302	397	2.543	0
Energia útil (MWh/ano)	358	62	392	-

O **Ambiente Econômico** é inserido como um conjunto de informações adicionais relacionadas ao custo de instalação e manutenção do sistema durante sua vida útil, e aos produtos gerados: a energia útil produzida e a economizada e a redução da emissão de Gases de Efeito Estufa-GEE, por exemplo. Como análise econômica preliminar, propõe-se, o Programa RETScreen³, que se caracteriza como uma ferramenta de apoio na tomada de decisões mediante análises financeiras e de risco realizadas sempre de forma comparativa entre dois tipos de tecnologia de geração de energia: a tecnologia de referência, já estabelecida ou em utilização (caso referência), e a opção renovável proposta (caso proposto). As análises são fundamentadas, via um fluxo de caixa, nos custos envolvidos durante o tempo de vida do sistema, na avaliação da produção e economia de energia e na redução das emissões para vários tipos de tecnologias eficientes ou renováveis. A produção de energia pode ser de uma única fonte renovável ou de um conjunto de fontes. Análises econômico-financeiras da geração de energia elétrica por fontes renováveis, como a solar e a eólica, são bastante complexas. Depende fortemente do tipo de tecnologias de geração, operação, transmissão e distribuição, subsídios e sempre dos efeitos do clima. Além, evidentemente da tarifa elétrica local e do tipo de combustível utilizado na geração da energia elétrica da fonte convencional. Particularmente, no caso do Brasil que apresenta uma matriz energética com 89% de eletricidade renovável, predominantemente hídrica (77%), BEN, (2008) e um modelo de contratação de energia elétrica, pelas empresas distribuidoras, por sistema de leilão com o critério de menor custo e de contratos de longo prazo, é evidente que esse universo não é o nicho de aplicação de SFCR. No momento atual do Brasil, para a tecnológica de geração de eletricidade por SFCR, onde o produtor é o consumidor, o estudo econômico-financeiro deve considerar que: a energia elétrica produzida pelo SFCR deve ser totalmente injetada diretamente na rede elétrica, considerando, como estratégia de operação, a potência máxima de saída; e o preço da energia produzida e injetada na rede elétrica da concessionária igual à tarifa da energia, proveniente da rede convencional e que deixou de ser consumida. Ou seja, para o usuário/produtor de energia de SFCR, a tarifa de comparação deve ser a desembolsada pelo mesmo com sua "Conta de Luz". A tarifa elétrica depende fortemente do tipo de combustível, tecnologias de geração, operação, transmissão e distribuição, subsídios e sempre dos efeitos do clima. A tarifa de energia residencial relativas às companhias brasileira situa-se em torno de $0,45$ a $0,50 \text{ R\$/kWh}$ ($0,2$ a $0,25 \text{ US\$/kWh}$).

³ Clean Energy Project Analysis – RETScreen International, Minister of Natural Resources Canada, (2001-2005) in www.retscreen.net

Outros dados de entrada importantes para a análise são os custos: de investimento para a instalação do sistema, de manutenção ao longo do seu tempo de vida e do dinheiro. Valores bastante variáveis em função da localidade e do tipo de tecnologia do módulo fotovoltaico. Por exemplo, nos Estados Unidos, valores mais atuais situam-se na faixa de 5 a 9 US\$/KWp instalado, (www.solarbuzz.com 07/2008). No caso do Brasil, para SFCR de pequeno porte de Silício cristalino (c-Si) de R\$ 24,00 (12,0 US\$/Wp_{inst}), com correspondente custo por metro quadrado de fotovoltaico em torno de 3.120,00 R\$/m², (1.560,00 US/m²), Barbosa, (2009). Onde cerca de 92% do custo total corresponde ao investimento (equipamentos e ferramentas de projeto), 8% do total ao custo da instalação que envolve as despesas com materiais e acessórios e o custo com a mão-de-obra de instalação. Rütter et al., (2008) estima cerca de 5,00 Euros/Wp instalado (~9,00 US\$) para SFCR em telhados dentro de um programa de 1.000 MWp. Nesse caso, o tipo da tecnologia da célula fotovoltaica proposta, de Silício amorfo (a-Si) e o volume de aquisição de módulos FV previsto, podem ter contribuído para a redução do custo. Normalmente, módulos de (a-Si) apresentam menor custo do que os módulos de (c-Si). O fator escala na aquisição dos equipamentos tem forte e importante influência na composição do custo de investimento. Nesse caso, os resultados podem ser mais promissores. Segundo, Lorenzo (1994) há uma redução de cerca de 40% a 45% no custo do kWp instalado, entre as instalação de um sistema FV autônomo de 10 KWp e de mil sistemas também de 10 kWp.

O **Ambiente Analítico** é responsável pela apresentação dos resultados e informações disponíveis de forma mais acessível e espacialmente visíveis. Recebe como dados de entrada os produtos dos demais ambientes. Agrega todas as informações traduzindo-as em possibilidades de intervenção. Utiliza como ferramenta base, a metodologia de SIG-Sistema de Informação Geográfica, (Geographical Information System-GIS). O (SIG) permite agrupar informações inter-relacionadas e de naturezas diversas, quantificar fatores determinantes e colocar as informações disponíveis de forma mais acessível e espacialmente visíveis. Possibilita a realização de análises rápidas e precisas e redução do tempo para tomadas de decisões. Configura-se como um programa de suporte decisório a planejamentos alimentado por informações pertinentes a determinados questionamentos.

Na presente proposta, um programa elaborado chamado SIG-SFCR, utiliza o mapa de localização georreferenciado do espaço em estudo como informação espacial e como dados de entrada às informações provenientes dos demais ambientes organizadas em uma planilha eletrônica, TAB-SIG/SFCR. A Tab-SIG/SFCR foi elaborada com capacidade para um número muito grande de tipos de variáveis, como: natureza e tipo de uso da edificação, tipo de material do telhado, número de águas, inclinação e área do telhado, coordenadas de posição de pontos no telhado, fatores de ocupação, posição, sombras, Nível de Luz do Ceul, área útil e capacidade nominal do sistema compatível, potencial de geração de energia e custo do sistema, entre outras. Os resultados obtidos podem ser apresentados em função das variáveis previamente definidas na elaboração dos dados de entrada. Mediante determinados questionamentos, baseado em uma ou mais variável, que se traduzem em equações, a Tab-SIG/UFPE/S é consultada, e a resposta é mostrada graficamente a partir da informação vetorial selecionada. As possibilidades de visualização dos resultados são diversificadas, podendo ser individualizadas (todas as unidades que satisfazem um a um os critérios) ou em conjunto (unidades que atendem todos os critérios). Como demonstrativo do processo e da operacionalidade e versatilidade do SIG-SFCR apresenta-se um resumo conclusivo dos dados mais relevantes para as edificações exemplos e alguns resultados expressos em função do Nível de Luz de Céu (NLC) perante alguns questionamentos. Outros questionamentos podem ser formulados, em função das variáveis colocadas como dados de entrada na Tab-SIG/SFCR.

Observa-se que: 1) A área total de telhados envolvida no estudo-exemplo resulta em aproximadamente 9.510 m²; 2) Cerca de 51% da área total, 4845 m² podem ser convertidos em área de fotovoltaicos com indicativo da possibilidade de instalação de cerca de 630 kWp e produção de 156 kWh/m² de energia elétrica via SFCR. 3) Anualmente, cerca de 750 MWh de energia elétrica podem ser produzidos e injetados na rede elétrica convencional.

Exemplos de Questionamentos: a) Entre os telhados analisados quais não estão disponíveis à aplicação de SFCR ou a aplicação não é viável? b) Entre os telhados analisados quais os melhores em função do Nível de Luz do Céu? O SIG-UFPE/SFCR consulta a Tab-SIG/SFCR seleciona todas as possibilidades que satisfazem os questionamentos e apresenta espacialmente os resultados, como mostrado na Figura 4.

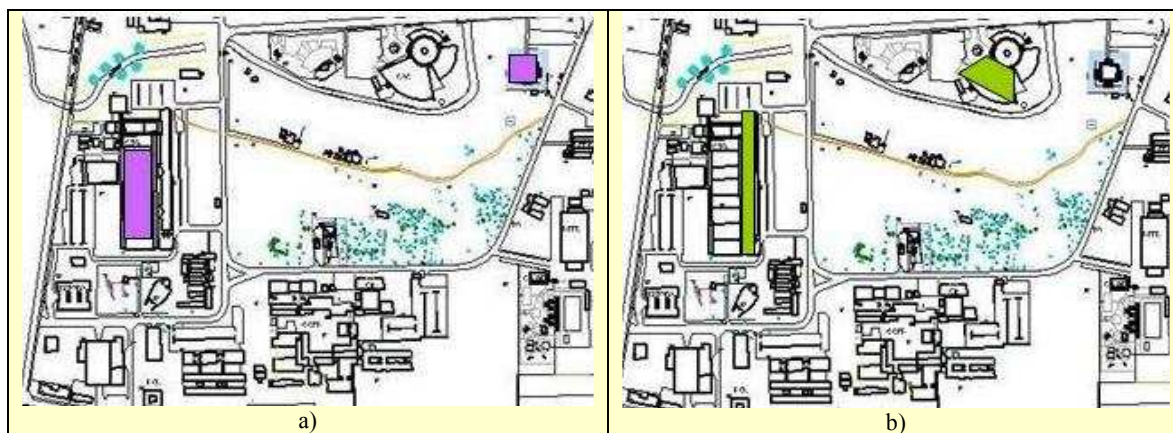


Figura 4: Mapa demonstrativo das edificações que satisfazem os questionamentos: a) telhados não aplicáveis à instalação de SFCR, (NLC=0) e b) Melhores telhados em função do Nível de Luz do Céu ($0,7 \leq NLC$)

CONCLUSÃO

- A metodologia desenvolvida apresenta-se como um mecanismo até então não disponível no Brasil para estimativas do potencial de sistemas
- É versátil e rápida para avaliações de potencial de geração elétrica por SFCR em centros urbanos;
- Envolve um número pequeno de tipos de informação;
- É abrangente podendo ser aplicada de uma forma geral para a geração;
- É abrangente podendo ser aplicada de uma forma geral para a geração de energia solar em telhados como por coletores térmicos, por exemplo;
- Não é restritiva podendo ser aplicada a diferentes sítios;
- Especificadamente os procedimentos de avaliação de áreas úteis de telhados podem ser utilizados para outros objetivos, por exemplo, como estimativa de captação de água de chuva;
- Os resultados dependem fortemente do nível qualitativo e quantitativo das informações sobre o local e suas edificações.

REFERÊNCIAS

- Barbosa, E. M de S. (2009). Metodologia de avaliação do potencial de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em telhados - Aplicação ao CAMPUS DA UFPE. Tese de Doutorado. Orientador Dr. Roberto Fernando de Andrade Lima. Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares PROTEN, No. 58. Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.
- BEN 2007: (2008). Balanço Energético Nacional 2007. MME. Governo Federal. Brasil 2008. [<http://www.mme.gov.br>]
- Izquierdo, S., Rodrigues, M., Fueyo, N. (2008) A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy* vol. 82 (10), pp 929-939. ISSN 0038-092X
- Kreith, F., Kreider, J.F. (1978). *Principles of Solar Engineering*. New York – USA, McGraw-Hill.
- Lorenzo, E. (1994) *Electricidad Solar. Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos*. Artes Gráficas Gala, S.L. 1ª. Edição. 1994. ISBN: 84-86505-45-3.
- Manual del arquitecto-energía solar fotovoltaica.-Junta de Castilla Y Leon. ISBN: 84-9718-258-8.
- Manual de capacitação em projetos de sistemas de aquecimento solar- ABRAVA. 2008.
- RETSCREEN International. *Clean Energy Project Analysis*. Natural Resources Canada, 3a Edition. [<http://www.resteren.net>]
- Ruther, R., Salamoni, I., Montenegro, A., Braun, P., Devienne, F. R. (2008) Programa de telhados solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica pública no Brasil. XII-ENTAC-Encontro Nacional de Tecnologias do Ambiente Construído.
- Ruther, R., Salamoni, I., Jardim, C. Da S., Knob, P. (2007) O potencial da geração FV integrada a edificações e conectada à rede elétrica pública no Brasil, I CBENS-I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, CE, Abril.
- Stemmers, K. (2001) PV in the city- A design and implementation guide. *Renewable Energy World*. vol 4, n.6, p. 106-114.
- Tiba, C., Fraidenraich, N., Barbosa, E. M. de S. (1999) Instalações de sistemas fotovoltaicos para residências rurais e bombeamento de água. Versão 2.0 Editora Universitária da UFPE. Recife, 1999. INSB 662.997 621.47

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos do Grupo FAE/UFPE: Rinaldo de O. Melo, Marcelo Rodrigues e Eric Lopes.

ABSTRACT

The establishment of policies that can allow the growth of decentralized electrical generation development in urban areas through Grid Connected Photovoltaic System (GCPVS) strongly depends on the evaluation of its potential efficacy and economic viability. Although knowledge an area's potential for solar resources is the determining factor, the evaluation should be accompanied by estimates of the available surface for installations, information relative to the system's technical performance and to the profits and losses involved in the reduction of energy consumption in the conventional grid. Within this context arises the development of a methodology to evaluate the potential for GCPVS electrical generation on the roofs of urban spaces. The methodology is based on evaluations regarding three potentials: the physical potential, represented by the total quantity of collected energy by the determined area under observation; the geographical potential, which translates into the dimensions of the area's incidental energy production; and the technical potential, which relates to the photovoltaic energy generation technology, performance and technical characteristics of the equipment. The procedures and methodological tools used were grouped into five environments (*Physical, Geographical Technical Economic, Analytical*) as functions of the products/results that may be produced.

Key words: Photovoltaic system; Potential of photovoltaic roofs; Performance of PV system; decentralized electrical generation